

**REPARO DE AÇOS  
ESTRUTURAIS COM  
COMPÓSITOS CFRP E GFRP:  
REVISÃO CRÍTICA DAS  
PROPRIEDADES  
MECÂNICAS, ADESÃO,  
DURABILIDADE E  
APLICABILIDADE  
ESTRUTURAL**

**REPAIR OF STRUCTURAL STEELS WITH CFRP AND GFRP COMPOSITES: A  
CRITICAL REVIEW OF MECHANICAL PROPERTIES, ADHESION,  
DURABILITY AND STRUCTURAL APPLICABILITY**

Engenharias • 12/06/2026

REGISTRO DOI: [10.70773/revistatopicos/781149332](https://doi.org/10.70773/revistatopicos/781149332)

---

Felipe Roberto da Silva e Silva<sup>1</sup>

Silvana de Abreu Martins<sup>2</sup>

---

## RESUMO

Os aços estruturais de baixo carbono, como ASTM A36 e AISI 1020, são amplamente empregados em infraestruturas críticas, incluindo pontes, edifícios, oleodutos e plataformas offshore, devido à combinação entre resistência mecânica, ductilidade, disponibilidade e custo relativamente baixo. Contudo, estão sujeitos à degradação por corrosão, perfurações, perda localizada de espessura e fissuração por fadiga, o que compromete a integridade estrutural e exige soluções de reparo confiáveis. Métodos convencionais, como soldagem, chapas metálicas aparafusadas e substituição parcial de componentes, permanecem utilizados, mas apresentam limitações associadas a tensões residuais, aumento de massa, dificuldade de execução em campo e parada operacional. Este trabalho apresenta uma revisão crítica consolidada da literatura recente sobre reparos compósito-aço com polímeros reforçados com fibras de carbono (CFRP) e de vidro (GFRP), com foco em propriedades mecânicas, adesão, fadiga, durabilidade, modos de falha e aplicabilidade estrutural. A análise indica que o CFRP possui maior potencial para reparos críticos, em razão da elevada rigidez, resistência específica e eficiência no controle da abertura de trincas, enquanto o GFRP pode ser mais adequado para intervenções preventivas, de estabilidade local ou de menor exigência estrutural, devido ao menor custo relativo, maior deformabilidade e boa tolerância a danos. Verificou-se que comparações diretas CFRP x GFRP sob condições equivalentes de aço, geometria, adesivo, preparação superficial, defeito, carregamento e envelhecimento ambiental ainda são escassas. Conclui-se que a seleção entre CFRP e GFRP deve considerar, de forma integrada, desempenho mecânico, adesão, durabilidade, custo, ambiente de serviço, estratégia de manutenção e nível de evidência experimental disponível.

**Palavras-chave:** adesão; CFRP; durabilidade; GFRP; reparo estrutural.

## **ABSTRACT**

Low-carbon structural steels, such as ASTM A36 and AISI 1020, are widely used in critical infrastructure, including bridges, buildings, pipelines and offshore platforms, because they combine mechanical strength, ductility, availability and relatively low cost. However, these materials are susceptible to corrosion, perforation, localized thickness loss and fatigue cracking, which compromise structural integrity and require reliable repair solutions. Conventional methods, such as welding, bolted steel plates and partial replacement of components, remain widely applied, but they may generate residual stresses, increase structural weight, create field application difficulties and require operational downtime. This paper presents a consolidated critical review of recent literature on composite-to-steel repair systems using carbon fiber reinforced polymers (CFRP) and glass fiber reinforced polymers (GFRP), focusing on mechanical properties, adhesion, fatigue, durability, failure modes and structural applicability. The analysis indicates that CFRP has greater potential for critical repairs because of its high stiffness, specific strength and efficiency in reducing crack opening, whereas GFRP may be more suitable for preventive, local-stability or less structurally demanding interventions due to its lower relative cost, greater deformability and damage tolerance. Although the CFRP-to-steel literature is more consolidated for fatigue and crack-control applications, experimental studies on GFRP-to-steel systems demonstrate relevant potential in beams, plates, tubular profiles, bonded joints and stiffener-based strengthening systems. Direct CFRP versus GFRP comparisons under equivalent steel substrate, geometry, adhesive, surface preparation, defect type, loading regime and

environmental aging remain scarce. It is concluded that material selection must integrate mechanical performance, adhesion, durability, cost, service environment, maintenance strategy and the level of experimental evidence available.

**Keywords:** adhesion; CFRP; durability; GFRP; structural repair.

## 1. INTRODUÇÃO

Os aços estruturais de baixo carbono ocupam posição central em sistemas de engenharia civil, mecânica e offshore, sendo amplamente empregados em pontes, edifícios, dutos, reservatórios e plataformas marítimas. Entre os materiais recorrentes nesse contexto destacam-se os aços ASTM A36 e AISI 1020, cujas propriedades mecânicas, facilidade de fabricação e custo competitivo favorecem sua aplicação em elementos submetidos a esforços estáticos e dinâmicos (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2024). Apesar dessas vantagens, tais aços estão sujeitos à degradação progressiva ao longo do serviço, especialmente em ambientes corrosivos ou sob carregamentos cíclicos prolongados.

Os principais mecanismos de dano incluem corrosão uniforme ou localizada, fissuração por fadiga, perfurações e perda de seção resistente. Esses processos reduzem a capacidade de carga, alteram a distribuição de tensões e aumentam a probabilidade de falha estrutural. Em situações de serviço severo, como ambientes marinhos, pontes rodoviárias de alto tráfego e componentes industriais sujeitos à vibração, os mecanismos de degradação podem atuar de forma combinada, acelerando o comprometimento estrutural (KIM; HARRIES, 2011; TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2003).

Tradicionalmente, os métodos de reparo mais utilizados incluem soldagem, reforço com chapas metálicas aparafusadas, rebites ou substituição localizada de componentes. Embora tais estratégias possam ser eficazes em diversas aplicações, apresentam limitações técnicas e operacionais relevantes. A soldagem pode introduzir tensões residuais, alterar microestruturas locais e afetar a tenacidade da zona termicamente afetada. Reforços metálicos aumentam a massa do sistema, podem dificultar o acesso em campo e nem sempre são adequados para estruturas em operação contínua. Além disso, muitos desses métodos exigem paralisação da instalação, elevando custos diretos e indiretos (CADEI et al., 2004; ZHAO; ZHANG, 2007).

Nesse contexto, os compósitos poliméricos reforçados com fibras, especialmente CFRP (Carbon Fiber Reinforced Polymer) e GFRP (Glass Fiber Reinforced Polymer), têm emergido como alternativas tecnologicamente atrativas. Esses materiais apresentam elevada relação resistência/peso, boa conformabilidade geométrica, facilidade de aplicação e potencial para reforço localizado sem aumento expressivo de massa. Em reparos estruturais, podem atuar redistribuindo tensões, reduzindo a concentração de esforços em regiões defeituosas e retardando a propagação de trincas (MEIER, 1995; ZHAO; ZHANG, 2007; TAFSIROJJAMAN et al., 2022).

Embora o CFRP seja o material mais amplamente estudado em reparos críticos de aço, especialmente em situações de fadiga e controle de trincas, a literatura sobre GFRP/aço também apresenta contribuições experimentais relevantes. Estudos com vigas metálicas, chapas esbeltas, perfis tubulares, juntas coladas e sistemas de stiffeners indicam que o GFRP pode atuar como alternativa técnica em aplicações nas quais a exigência de rigidez

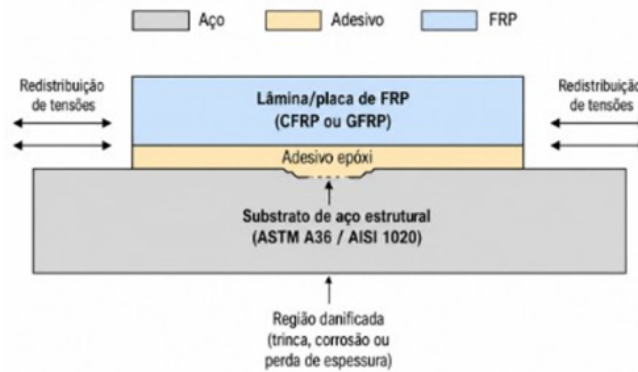
extrema seja menor, mas critérios como custo, deformabilidade, isolamento galvânico, mitigação de flambagem e facilidade de aplicação sejam relevantes (EL DAMATTY; ABUSHAGUR; YOUSSEF, 2003; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2012; AYDIN; AKTAS, 2015; BORU; AYDIN; SADID, 2023).

Entretanto, a comparação entre CFRP e GFRP ainda é limitada pela escassez de estudos conduzidos sob condições rigorosamente equivalentes. Muitos trabalhos avaliam apenas um tipo de compósito, ou comparam resultados obtidos em geometrias, adesivos, condições de preparação superficial e regimes de carregamento distintos. Entre os estudos mais próximos de uma comparação direta em aço, destacam-se ensaios com chapas finas de aço reforçadas com CFRP e GFRP sob carregamento cíclico quase-estático de cisalhamento (KHAZAEI POUL; NATEGHI-ALAH; ZHAO, 2016). Além disso, sistemas híbridos CFRP/GFRP ligados ao aço têm sido investigados como alternativa para combinar rigidez, ductilidade e desempenho interfacial, embora não representem comparação direta entre CFRP puro e GFRP puro (HAI; MUTSUYOSHI, 2012; HU et al., 2020).

A adoção de compósitos em reparos de aço estrutural não deve ser tratada como solução genérica. O desempenho depende criticamente da interação entre substrato metálico, adesivo estrutural, compósito e ambiente de serviço. Além disso, a literatura apresenta elevada heterogeneidade experimental, com diferenças em geometria de amostras, número de camadas, defeitos simulados, protocolos de envelhecimento, técnicas de preparação superficial e critérios de avaliação, o que dificulta comparações diretas e generalizações (FERNANDO et al., 2013; HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; BORRIE et al., 2021).

Diante desse panorama, este artigo tem por objetivo unificar e consolidar criticamente o conteúdo disponível sobre reparo de aços estruturais com compósitos CFRP e GFRP, integrando propriedades mecânicas, adesão, fadiga, durabilidade, modos de falha, custo relativo e aplicabilidade estrutural. A proposta consiste em desenvolver uma análise técnico-científica robusta, com comparação crítica entre estudos, interpretação mecanística dos resultados, identificação de limitações metodológicas e proposição de critérios para seleção entre CFRP e GFRP em diferentes contextos de engenharia. Uma contribuição específica da revisão é evidenciar que a escolha entre CFRP e GFRP ainda se apoia majoritariamente em comparações indiretas, reforçando a necessidade de estudos futuros sob uma mesma matriz experimental.

A Figura 1 apresenta, de forma esquemática, a configuração básica de um reparo compósito-aço, destacando o substrato metálico, a região danificada, a camada adesiva e o compósito FRP aplicado como elemento de reforço. Essa representação auxilia na compreensão da interação entre aço, adesivo e compósito, aspecto central para a eficiência do reparo estrutural discutido na literatura (Meier, 1995; Zhao; Zhang, 2007; Tafsirojjaman et al., 2022; Borrie et al., 2021).



**Figura 1** – Representação esquemática do reparo de aço estrutural com compósito FRP.

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base em Meier (1995), Zhao e Zhang (2007), Tafsirojjan et al. (2022) e Borrie et al. (2021).

Observa-se que o desempenho do reparo não depende apenas das propriedades isoladas do compósito, mas da ação conjunta entre o aço, a camada adesiva e o FRP. A região danificada tende a concentrar tensões, enquanto o compósito atua como elemento de reforço externo, contribuindo para redistribuir esforços e reduzir a solicitação local. Assim, falhas na preparação superficial, na cura do adesivo ou na proteção da interface podem comprometer a eficiência global do sistema.

Além desta introdução, o artigo está organizado em cinco seções. A seção de fundamentação teórica apresenta os principais conceitos relacionados aos aços estruturais de baixo carbono, aos compósitos CFRP e GFRP e aos adesivos estruturais empregados em reparos compósito-aço. Em seguida, a metodologia descreve os critérios adotados para seleção e análise crítica da literatura. A seção de resultados e discussão examina propriedades mecânicas, adesão, fadiga, durabilidade, modos de falha, comparação entre CFRP e GFRP e implicações práticas, econômicas e ambientais. Posteriormente, são discutidas as lacunas da literatura e as perspectivas futuras de pesquisa. Por fim, são apresentadas as conclusões da revisão.

## **2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA OU REVISÃO DA LITERATURA**

### **2.1. Aços Estruturais de Baixo Carbono**

A combinação entre resistência moderada e ductilidade razoável torna esses aços adequados para elementos submetidos a flexão, tração, compressão e carregamentos cíclicos. Contudo, a presença de entalhes, corrosão localizada, furos ou trincas altera significativamente o estado de tensões e acelera a nucleação e propagação de falhas. Em tais situações, métodos de reparo devem ser capazes de restabelecer a continuidade resistente e reduzir a intensidade de tensões nas regiões críticas (KIM; HARRIES, 2011; TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2003).

risco físico real que o CFRP possui: por ser eletricamente condutor, se colocado em contato direto com o aço sem uma camada isolante de adesivo ou fibra de vidro (GFRP), pode acelerar a corrosão galvânica do substrato metálico em ambientes salinos. Isso reforça ainda mais o papel do GFRP ou de sistemas híbridos como barreiras de isolamento.

### **2.2. Materiais Compósitos CFRP e GFRP**

O CFRP apresenta elevada resistência específica e elevado módulo de elasticidade, características que o tornam especialmente eficiente para aumento de rigidez e restrição de deformações em substratos metálicos. Em reparos estruturais, o alto módulo do CFRP favorece transferência rápida de carga e redução da abertura de trincas, o que explica seu bom desempenho em situações dominadas por fadiga e por exigência de elevada rigidez (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2003; KIM; HARRIES, 2011; BORRIE et al., 2021).

O GFRP, por sua vez, apresenta menor rigidez em relação ao CFRP, mas possui vantagens associadas ao menor custo, maior deformabilidade, boa disponibilidade comercial e maior tolerância a certos tipos de dano. Embora a literatura sobre GFRP aplicado diretamente ao reparo crítico de aço estrutural seja menos ampla do que aquela relacionada ao CFRP, o material permanece relevante como alternativa em reparos preventivos, aplicações menos críticas, sistemas de estabilidade local e configurações híbridas CFRP/GFRP (ZHAO; ZHANG, 2007; TAFSIROJJAMAN et al., 2022).

Embora a literatura sobre CFRP aplicado ao reparo de aço estrutural seja mais ampla, há estudos experimentais relevantes que demonstram o potencial do GFRP em sistemas aço-compósito. Ensaio com vigas de aço reabilitadas com lâminas de GFRP indicam que o material pode contribuir para o aumento da capacidade resistente e da rigidez flexional, especialmente quando adequadamente aderido ao substrato metálico. Além disso, estudos com chapas e vigas de aço reforçadas com placas de GFRP mostram que o compósito pode atuar na mitigação de flambagem local e no aumento da estabilidade de elementos esbeltos. Assim, o GFRP não deve ser tratado apenas como alternativa de menor desempenho ao CFRP, mas como uma solução com nichos próprios de aplicação, sobretudo quando custo, deformabilidade, isolamento galvânico e facilidade de execução são critérios relevantes (EL DAMATTY; ABUSHAGUR; YOUSSEF, 2003; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2012; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2013; AYDIN; AKTAS, 2015).

Do ponto de vista estrutural, a diferença entre CFRP e GFRP decorre não apenas do tipo de fibra, mas da forma como cada compósito transfere carga ao sistema reparado. O CFRP, por ser mais rígido, tende a reduzir mais intensamente as deformações do aço e a

intensidade de tensão na ponta de trinca. Já o GFRP, com módulo inferior, permite maior deformação global antes da falha, o que pode ser vantajoso em situações de impacto, reforço secundário ou quando se busca absorção de energia. Portanto, a escolha entre os dois materiais deve considerar não apenas resistência máxima, mas também ductilidade, custo, modo de falha admissível, ambiente de serviço e estratégia de manutenção.

Uma alternativa promissora para otimizar a relação custo-benefício e o desempenho mecânico de reparos estruturais é a hibridização, combinando camadas alternadas de CFRP e GFRP. Nesse cenário, a sequência de empilhamento (*stacking sequence*) exerce um papel primordial na magnitude e na distribuição das tensões de cisalhamento e arrancamento (*peel stresses*) na interface adesiva compósito-aço. Devido à acentuada disparidade de rigidez entre o carbono (alto módulo de elasticidade) e o vidro (baixo módulo), a disposição das lâminas dita o gradiente de transferência de carga. Estudos numéricos e experimentais indicam que o posicionamento de camadas de GFRP diretamente em contato com a linha de adesivo (interface com o substrato de aço) atua como uma zona de transição de rigidez suave, atenuando os picos de tensão concentrados nas extremidades do reparo. Por outro lado, concentrar as lâminas de CFRP na periferia externa do laminado maximiza o momento de inércia do reparo e a rigidez global à flexão ou tração, sem sobrecarregar localmente a camada de adesivo. Essa modulação da sequência de empilhamento permite postergar o início de falhas prematuras por delaminação ou descolamento (*debonding*), balanceando a eficiência estrutural do carbono com a complacência e isolamento dielétrico do vidro (SARRADO et al., 2016).

### **2.3. Adesivos Estruturais e Preparação de Superfície**

O desempenho do reparo compósito-metálico depende, em grande medida, da eficiência da interface adesiva. Em geral, adesivos epóxi bicomponentes são os mais empregados em razão de sua boa aderência ao aço e ao compósito, resistência mecânica adequada e relativa facilidade de aplicação (FERNANDO et al., 2013; BORRIE et al., 2021).

Entretanto, a resistência final da junta não é determinada apenas pelo adesivo em si, mas pelo estado superficial do substrato metálico. Técnicas como jateamento abrasivo, lixamento e aplicação de primers silânicos podem aumentar a rugosidade superficial, remover contaminantes e favorecer ancoragem mecânica e compatibilidade química na interface. Essa etapa é determinante porque, em muitos estudos, a falha do sistema reparado ocorre por delaminação ou ruptura na interface antes da ruptura das fibras (FERNANDO et al., 2013; HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017).

A aderência entre GFRP e aço merece atenção específica, pois o desempenho do sistema reforçado depende da transferência eficiente de esforços pela linha adesiva. Estudos com juntas GFRP/aço do tipo double-strap demonstram que as condições de cura, exposição higrotérmica, ciclos úmido-seco e temperatura podem modificar o modo de falha, a rigidez e a capacidade resistente da junta. Esses resultados indicam que a avaliação do GFRP em aço não deve se limitar ao desempenho mecânico inicial, sendo necessário considerar também a evolução da interface adesiva ao longo do tempo e sob condições ambientais agressivas (LIU et al., 2020a; LIU et al., 2020b; LIU et al., 2020c).

Além dos sistemas constituídos exclusivamente por CFRP ou GFRP, estudos com juntas híbridas FRP/aço têm investigado a combinação de camadas de carbono e vidro para equilibrar rigidez, ductilidade e desempenho interfacial. Ensaios com juntas FRP-aço híbridas indicam que a sequência de empilhamento e a interação entre camadas de CFRP e GFRP influenciam o comportamento de aderência, a distribuição de tensões e os modos de falha. Esses estudos não devem ser interpretados como comparação direta entre CFRP puro e GFRP puro, mas contribuem para compreender estratégias híbridas de reforço e reparo (HAI; MUTSUYOSHI, 2012; HU et al., 2020).

Normas como ASTM D4541, para ensaio pull-off, e ASTM D1002, para ensaio de cisalhamento em junta sobreposta, são largamente utilizadas para caracterizar adesão em sistemas metálicos e revestimentos ou juntas adesivas (AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2019; AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS, 2022). Ainda assim, a ausência de protocolos universalmente padronizados para preparação superficial, espessura do adesivo e condicionamento ambiental constitui um dos principais fatores que limitam a comparabilidade entre estudos.

### **3. METODOLOGIA**

O presente trabalho consiste em uma revisão crítica e integrativa da literatura sobre o reparo e reforço de aços estruturais com compósitos poliméricos reforçados com fibras, com ênfase em sistemas CFRP/aço e GFRP/aço. A busca bibliográfica foi conduzida em bases científicas como Scopus, Web of Science, ScienceDirect, SpringerLink e MDPI, utilizando combinações de termos relacionados a “CFRP steel repair”, “FRP strengthened steel

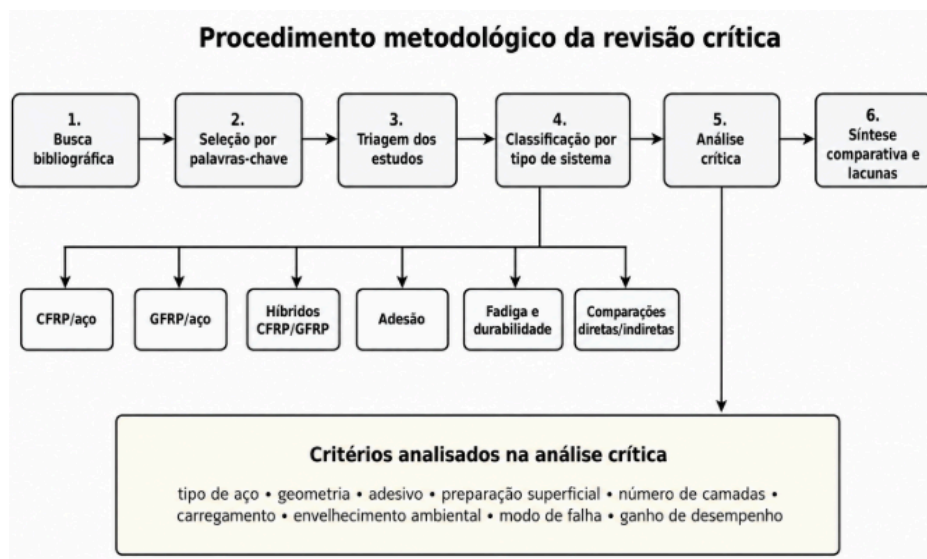
structures”, “GFRP steel reinforcement”, “GFRP strengthened steel beams”, “GFRP-to-steel bonded joints”, “CFRP GFRP steel comparison”, “hybrid FRP-to-steel joints”, “fatigue strengthening of steel beams”, “bond durability”, “wet-dry cycles”, “hygrothermal aging” e “environmental durability”. Foram priorizados artigos experimentais, revisões técnico-científicas, normas técnicas e estudos com dados quantitativos de desempenho mecânico, adesão, fadiga, durabilidade ambiental ou modos de falha.

Os estudos selecionados foram analisados quanto ao tipo de aço, tipo de compósito, geometria do reparo, preparação superficial, adesivo empregado, número de camadas, condições de envelhecimento, modo de falha e ganho relativo de desempenho. Quando os dados foram quantitativos, buscou-se preservar a rastreabilidade da fonte original. A análise crítica foi conduzida por comparação entre mecanismos de transferência de carga, rigidez relativa dos compósitos, estabilidade da interface adesiva e adequação do material ao ambiente de serviço.

Além da análise individual de sistemas CFRP/aço e GFRP/aço, os estudos foram classificados quanto ao tipo de comparação realizada: comparação direta CFRP x GFRP no mesmo programa experimental, comparação híbrida CFRP/GFRP, comparação indireta entre estudos distintos ou referência complementar. Essa classificação permitiu identificar o grau de equivalência metodológica entre os trabalhos e avaliar a robustez das conclusões comparativas. Foram considerados mais fortes os estudos que mantiveram constantes variáveis como substrato metálico, geometria, adesivo, preparação superficial, número de camadas, regime de carregamento e condições ambientais.

Em razão da ausência, no material inicial, de referências completas para todos os autores e valores apresentados em versões anteriores dos quadros, optou-se por substituir dados numéricos não rastreáveis por sínteses comparativas fundamentadas em fontes verificáveis. Essa decisão metodológica reduz o risco de manutenção de dados sem base bibliográfica confirmada e aumenta a confiabilidade científica da revisão.

A Figura 2 sintetiza o procedimento metodológico adotado nesta revisão crítica, desde a busca bibliográfica até a organização dos estudos por tipo de sistema compósito-aço, mecanismos analisados e nível de comparabilidade experimental.



**Figura 2** – Fluxo metodológico de seleção, classificação e análise crítica da literatura. **Fonte:** Elaborado pelos autores com base no procedimento metodológico da revisão.

O fluxo metodológico evidencia que a revisão não se limita à reunião de estudos sobre CFRP/aço e GFRP/aço, mas busca classificá-los conforme o tipo de comparação realizada. Essa distinção é relevante porque poucos trabalhos mantêm constantes variáveis como substrato metálico, geometria, adesivo, preparação superficial, número de camadas, regime de carregamento e envelhecimento ambiental, o que limita comparações diretas entre CFRP e GFRP.

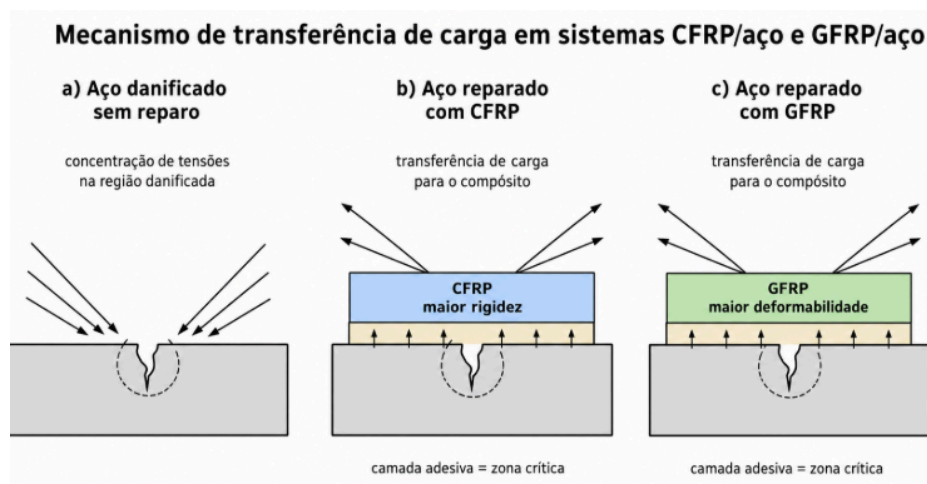
## **4. RESULTADOS E DISCUSSÕES**

### **4.1. Propriedades Mecânicas e Mecanismos de Reforço**

Os estudos analisados indicam que reparos em aço estrutural com CFRP apresentam elevada capacidade de recuperar rigidez e retardar a propagação de trincas, especialmente em elementos submetidos à fadiga. O mecanismo principal está relacionado à transferência de carga do aço danificado para o compósito, reduzindo a abertura de trincas e a intensidade de tensões na região crítica (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2003; KIM; HARRIES, 2011).

A superioridade mecânica do CFRP em relação ao GFRP está associada ao maior módulo de elasticidade e à maior resistência específica da fibra de carbono. No entanto, essa vantagem não é absoluta, pois a maior rigidez também eleva as tensões de cisalhamento na interface adesiva, aumentando a importância do preparo superficial, da espessura da linha adesiva e da resistência do adesivo (FERNANDO et al., 2013; BORRIE et al., 2021).

A Figura 3 ilustra o mecanismo de transferência de carga em elementos de aço danificados, comparando a condição sem reparo com sistemas reforçados por CFRP e GFRP. O esquema sintetiza a diferença de resposta entre os compósitos, pois o CFRP tende a restringir mais intensamente a abertura de trincas, enquanto o GFRP pode permitir resposta mais deformável, com potencial interesse em aplicações de menor criticidade estrutural (Tavakkolizadeh; Saadatmanesh, 2003; Kim; Harries, 2011; Zhao; Zhang, 2007; Khazaei Poul; Nateghi-Alahi; Zhao, 2016)



**Figura 3 – Mecanismo de transferência de carga em sistemas CFRP/aço e GFRP/aço. Mecanismo esquemático de transferência de carga em sistemas CFRP/aço e GFRP/aço.**

**Fonte: Elaborado pelos autores com base em Tavakkolizadeh e Saadatmanesh (2003), Kim e Harries (2011), Zhao e Zhang (2007) e Khazaei Poul, Nateghi-Alahi e Zhao (2016). Fonte:**

Elaborado pelos autores com base em Tavakkolizadeh e Saadatmanesh (2003), Kim e Harries (2011), Zhao e Zhang (2007) e Khazaei Poul, Nateghi-Alahi e Zhao (2016).

**a) Aço danificado sem reparo:**

setas convergindo para a trinca:

**concentração de tensões na região danificada.**

**b) Aço reparado com CFRP:**

setas saindo da interface aço–adesivo e subindo para o CFRP:

**transferência de carga para o compósito.**

**c) Aço reparado com GFRP:**

setas saindo da interface aço–adesivo e subindo para o GFRP:

**transferência de carga para o compósito.**

A comparação esquemática mostra que o CFRP, por apresentar maior rigidez, tende a absorver parcela mais significativa dos esforços transferidos pela região danificada, contribuindo para reduzir a abertura de trincas e retardar sua propagação. O GFRP, por outro lado, apresenta menor rigidez relativa e maior

deformabilidade, podendo ser mais adequado em situações nas quais a absorção de energia, o custo e a estabilidade local sejam critérios relevantes. Em ambos os casos, a camada adesiva permanece como elemento crítico para a transferência eficiente de carga.

O GFRP tende a oferecer reforço menos rígido, porém mais deformável e potencialmente mais vantajoso em aplicações de menor criticidade, nas quais a absorção de energia, o custo e a tolerância a dano sejam critérios relevantes. A literatura específica sobre GFRP aplicado diretamente ao reparo crítico de aço estrutural ainda é menos consolidada que a de CFRP/aço, mas não é inexistente. Estudos com vigas, chapas, perfis tubulares e placas reparadas demonstram que o GFRP pode contribuir para aumento de rigidez, melhoria de capacidade resistente, mitigação de flambagem local e reforço de elementos metálicos esbeltos (EL DAMATTY; ABUSHAGUR; YOUSSEF, 2003; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2012; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2013; AYDIN; AKTAS, 2015; BORU; AYDIN; SADID, 2023).

Em placas e vigas de aço, o GFRP pode atuar de modo diferente do CFRP. Enquanto o CFRP é mais eficiente na restrição de abertura de trincas e redistribuição intensa de tensões em reparos críticos, o GFRP pode ser útil na melhoria da estabilidade local e no aumento da resistência de elementos esbeltos. Estudos sobre reforço de chapas de aço com placas de GFRP indicam aumento da capacidade de flambagem, enquanto estudos com vigas e perfis RHS reforçados com GFRP evidenciam potencial de melhoria em flexão e estabilidade estrutural (SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2012; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2013; BORU; AYDIN; SADID, 2023).

Entre os estudos que mais se aproximam de uma comparação direta entre CFRP e GFRP em aço, destacam-se os ensaios com chapas finas de aço reforçadas com FRP sob carregamento cíclico quase-estático de cisalhamento. Nesse trabalho, chapas reforçadas com CFRP e GFRP foram avaliadas em condições comparáveis, indicando que ambos os compósitos podem aumentar a rigidez e a resistência do sistema, embora a interpretação dos resultados dependa da configuração do reforço, do número de camadas e do mecanismo de falha predominante (KHAZAEI POUL; NATEGHI-ALAH; ZHAO, 2016). Essa evidência é particularmente importante porque demonstra que a comparação entre fibras de carbono e vidro deve ser feita a partir de uma matriz experimental controlada, evitando extrapolações baseadas apenas em propriedades isoladas das fibras.

O Quadro 1 sintetiza os principais critérios técnicos para comparação entre CFRP e GFRP em reparos e reforços de aços estruturais, destacando vantagens, limitações, aplicações indicadas e lacunas ainda existentes na literatura. Ele reforça que o GFRP possui base experimental relevante em aço, mas distribuída em diferentes linhas de pesquisa, como reabilitação de vigas, reforço contra flambagem, reparo de placas, juntas adesivas e sistemas híbridos. Assim, a comparação com CFRP deve evitar conclusões absolutas: o CFRP apresenta vantagem clara em reparos críticos e fadiga, enquanto o GFRP se destaca como solução complementar para estabilidade local, reforços secundários, intervenções preventivas e aplicações com maior restrição econômica. A ausência de uma quantidade expressiva de estudos comparativos diretos sob condições equivalentes permanece como limitação central para a definição de critérios quantitativos universais.

**Quadro 1** - Síntese crítica das contribuições mecânicas de CFRP e GFRP em reparos/reforços de aço estrutural

<b>Critério</b>	<b>CFRP</b>	<b>GFRP</b>	<b>Interpretação crítica</b>	<b>Fontes principais</b>
Rigidez	Elevada	Moderada	CFRP é mais eficiente na redução de deformações locais e abertura de trincas; GFRP permite resposta mais deformável e pode ser útil em estabilidade local.	Zhao e Zhang (2007); Tafsirojjaman et al. (2022); Siddique e El Damatty (2012, 2013)
Desempenho em fadiga	Muito favorável	Potencial relevante em juntas, mas menos consolidado em reparo de trincas de aço	CFRP possui evidência experimental mais robusta para retardamento de trincas em aço; GFRP possui estudos relevantes em juntas coladas submetidas a carregamento cíclico.	Tavakkolizadeh e Saadatmanesh (2003); Kim e Harries (2011); Liu et al. (2020b, 2020c)
Recuperação/reforço de	Alta quando a interface é adequada	Moderada a relevante, dependendo da aplicação	A eficiência depende da qualidade da junta, da	Borrie et al. (2021); Cadei et al. (2004); El Damatty,

capacidade estrutural			geometria do reforço e do mecanismo dominante, como tração, flexão ou flambagem.	Abushagur e Youssef (2003); Aydin e Aktas (2015)
Estabilidade e local/flambagem	Pode contribuir, mas é mais usado para rigidez e fadiga	Evidência experimental relevante em chapas, vigas e stiffeners	GFRP apresenta potencial em mitigação de flambagem e reforço de elementos esbeltos.	Siddique e El Damatty (2012, 2013); Ülger e Okeil (2016, 2022); Pham, Mohareb e Fam (2018)
Ductilidade global	Pode reduzir a deformabilidade local	Tende a preservar maior deformabilidade	GFRP pode ser interessante quando se busca tolerância a deformações, absorção de energia e menor custo.	Zhao e Zhang (2007); Tafsirojjan et al. (2022); Boru, Aydin e Sadid (2023)
Comparações diretas disponíveis	Literatura mais consolidada em reparos críticos, fadiga e controle de trincas	Estudos diretos ainda menos frequentes; há evidência em chapas finas, juntas, sistemas híbridos e aplicações de estabilidade local	A seleção entre CFRP e GFRP ainda depende majoritariamente de comparações indiretas, pois poucos estudos mantêm todas as variáveis experimentais	Khazaei Poul, Nateghi-Alahi e Zhao (2016); Hai e Mutsuyoshi (2012); Hu et al. (2020)

			s equivalentes.	
Aplicação preferencial	Reparos críticos, fadiga e controle de trincas	Reparos preventivos, secundários, estabilidade local, stiffeners e sistemas híbridos	A escolha deve considerar exigência estrutural, custo, ambiente, modo de falha, matriz experimental e manutenção.	Cadei et al. (2004); Borrie et al. (2021); El Damatty, Abushagur e Youssef (2003); Ülger e Okeil (2022)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na literatura indicada.

Observa-se que CFRP e GFRP não devem ser tratados como materiais diretamente intercambiáveis. O CFRP apresenta desempenho superior em aplicações críticas que exigem elevada rigidez e resistência, enquanto o GFRP pode ser uma solução tecnicamente adequada e economicamente atrativa em aplicações de menor exigência estrutural. Além disso, a escassez de estudos comparativos diretos sob condições experimentais equivalentes reforça a necessidade de cautela na generalização dos resultados e justifica novas pesquisas comparativas.

#### **4.2. Adesão e Preparação Superficial**

A adesão entre compósito e aço é o principal parâmetro de transferência de carga no sistema reparado. A literatura mostra que falhas adesivas, falhas coesivas no adesivo e delaminação são modos de falha recorrentes em juntas CFRP/aço, especialmente quando a preparação superficial é inadequada ou quando o sistema é exposto

a ambientes agressivos (FERNANDO et al., 2013; HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; BORRIE et al., 2021).

A influência da preparação superficial é particularmente relevante. O jateamento abrasivo, quando adequadamente controlado, tende a produzir rugosidade mais uniforme e melhor ancoragem mecânica do que lixamentos leves ou tratamentos pouco padronizados. Além disso, a limpeza da superfície e a remoção de contaminantes são essenciais para evitar que a ruptura ocorra prematuramente na interface aço/adetivo (FERNANDO et al., 2013). Assim, o uso de primers, incluindo sistemas silânicos, pode melhorar a compatibilidade química e a estabilidade da interface, embora sua eficiência dependa do tipo de aço, do adesivo, do compósito e das condições ambientais. Em ambientes úmidos, salinos ou sujeitos a ciclos térmicos, a função do primer deixa de ser apenas aumentar a adesão inicial e passa a envolver também a proteção da interface contra degradação progressiva (HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; REN et al., 2022).

No caso específico de GFRP/aço, estudos com juntas double-strap indicam que a resposta da interface é sensível às condições de cura, envelhecimento higrotérmico, ciclos úmido-seco e temperatura. Esses fatores podem alterar a rigidez inicial da junta, a capacidade resistente, o modo de falha e a vida em fadiga. Portanto, a análise do GFRP em aço não deve se restringir à resistência inicial do compósito, devendo incorporar a evolução da linha adesiva e da interface ao longo do tempo (LIU et al., 2020a; LIU et al., 2020b; LIU et al., 2020c).

Além dos sistemas constituídos exclusivamente por CFRP ou GFRP, estudos com juntas híbridas FRP/aço têm investigado a combinação

de camadas de carbono e vidro para equilibrar rigidez, ductilidade e desempenho interfacial. Ensaios com juntas FRP-aço híbridas indicam que a sequência de empilhamento e a interação entre camadas de CFRP e GFRP influenciam o comportamento de aderência, a distribuição de tensões e os modos de falha. Esses estudos não devem ser interpretados como comparação direta entre CFRP puro e GFRP puro, mas contribuem para compreender estratégias híbridas de reforço e reparo (HAI; MUTSUYOSHI, 2012; HU et al., 2020).

O Quadro 2 sintetiza os principais fatores que influenciam a adesão entre compósitos poliméricos reforçados com fibras e substratos de aço. São apresentados os efeitos esperados de cada variável sobre o desempenho da junta adesiva, os riscos associados ao controle inadequado desses fatores e as principais referências que fundamentam cada aspecto. A análise evidencia que a preparação superficial, a limpeza do substrato, o tipo de adesivo, a espessura da linha adesiva, o uso de primers, as condições de cura, o envelhecimento ambiental e a hibridização CFRP/GFRP são variáveis decisivas para a eficiência e durabilidade do reparo compósito-aço.

#### **Quadro 2 - Fatores críticos para adesão compósito-aço**

<b>Fator</b>	<b>Efeito esperado</b>	<b>Risco quando inadequado</b>	<b>Fontes principais</b>
Rugosidade superficial	Aumenta ancoragem mecânica e área efetiva de contato	Falha adesiva precoce e baixa transferência de carga	Fernando et al. (2013); Borrie et al. (2021)

Limpeza e remoção de contaminantes	Melhora molhabilidade e compatibilidade adesiva	Descolamento na interface aço/adesivo	Fernando et al. (2013)
Tipo de adesivo epóxi	Define resistência ao cisalhamento e tenacidade da junta	Ruptura coesiva ou fissuração da linha adesiva	Borrie et al. (2021); Heshmati et al. (2017)
Espessura da linha adesiva	Controla distribuição de tensões	Concentração de tensões e delaminação	Cadei et al. (2004); Borrie et al. (2021)
Primer/silano	Pode aumentar compatibilidade química e durabilidade	Perda acelerada de adesão em ambientes agressivos	Heshmati et al. (2017); Ren et al. (2022)
Condições de cura em GFRP/aço	Influenciam rigidez, resistência e modo de falha	Perda de capacidade resistente e alteração da falha da junta	Liu et al. (2020a)
Envelhecimento higrotérmico em GFRP/aço	Permite avaliar degradação progressiva da interface	Redução de desempenho sob carga cíclica e ambiente agressivo	Liu et al. (2020b, 2020c)
Hibridização CFRP/GFRP	Pode combinar rigidez, ductilidade e redistribuição de tensões	Interpretação inadequada se tratada como comparação direta entre materiais puros	Hai e Mutsuyoshi (2012); Hu et al. (2020)

Fonte: Elaborado pelos autores com base na literatura indicada.

Observa-se que a adesão compósito-aço é governada por uma combinação de fatores mecânicos, químicos, geométricos e

ambientais. Portanto, mesmo compósitos de alto desempenho, como o CFRP, ou alternativas de menor custo, como o GFRP, podem apresentar desempenho insatisfatório quando a preparação superficial, a cura do adesivo ou a proteção ambiental da interface não são adequadamente controladas.

A principal implicação prática é que o CFRP, por transferir níveis mais elevados de carga, exige junta adesiva mais robusta. Dessa forma, sua superioridade mecânica só se concretiza plenamente quando a interface é adequadamente projetada. No caso do GFRP, a menor rigidez pode reduzir as solicitações interfaciais, mas o desempenho global continua dependente da integridade da junta adesiva, principalmente em ciclos ambientais e carregamentos repetidos. Sistemas híbridos CFRP/GFRP podem ampliar o espaço de projeto, mas ainda exigem validação específica para cada configuração de empilhamento e tipo de carregamento.

### **4.3. Fadiga e Durabilidade**

O comportamento em fadiga constitui um dos pontos mais relevantes na comparação entre CFRP e GFRP. Estudos clássicos com vigas de aço reforçadas por CFRP demonstram que o reparo pode retardar significativamente a propagação de trincas, desde que a ancoragem e a integridade da interface sejam mantidas durante o carregamento cíclico (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2003; KIM; HARRIES, 2011). A explicação mecânica é consistente com a teoria da propagação de trincas. Como o CFRP restringe mais intensamente a abertura da trinca e reduz a deformação local do aço, o fator de intensidade de tensão na ponta da trinca tende a diminuir, retardando a propagação por fadiga. Entretanto, se a interface adesiva sofre degradação ou delaminação,

parte desse benefício é perdida, e o compósito deixa de atuar de forma eficiente como ponte de transferência de carga.

No campo da fadiga em GFRP/aço, estudos experimentais com juntas coladas submetidas a carregamento cíclico indicam que a temperatura, o envelhecimento higrotérmico e a amplitude de carregamento influenciam diretamente a vida útil da junta. Esses resultados são importantes porque mostram que o GFRP pode ser aplicado em sistemas metálicos submetidos a solicitações repetidas, mas sua eficiência depende da manutenção da integridade da interface adesiva. Portanto, a comparação com CFRP deve considerar não apenas rigidez e resistência, mas também a sensibilidade da junta às condições ambientais e ao regime de carregamento (LIU et al., 2020b; LIU et al., 2020c; ÜLGER; OKEIL, 2022).

No que se refere à durabilidade ambiental, os estudos mostram que a fibra em si tende a manter desempenho relativamente estável, enquanto a interface adesiva constitui a parte mais sensível do sistema. Ensaios de envelhecimento acelerado por ciclos úmido-seco e gelo-degelo indicam que a degradação da junta CFRP/aço está fortemente associada à absorção de umidade, à deterioração do adesivo e à perda de integridade na interface (HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; LI et al., 2018; REN et al., 2022; LIU et al., 2023). Em sistemas GFRP/aço, a literatura também aponta sensibilidade a envelhecimento higrotérmico, temperatura e ciclos ambientais, especialmente em juntas adesivas e sistemas com stiffeners (LIU et al., 2020a; LIU et al., 2020b; ÜLGER; OKEIL, 2022).

Como referência complementar de durabilidade ambiental, estudos comparando juntas adesivas de compósitos CFRP e GFRP em

ambiente marinho indicam que a exposição à água do mar pode alterar propriedades mecânicas, comportamento interfacial e desempenho em flexão ou impacto. Embora esses resultados não possam ser transferidos diretamente para juntas aço-FRP, eles reforçam a necessidade de considerar absorção de umidade, degradação da matriz polimérica e estabilidade da interface em ambientes agressivos (ATAKOK; MERTGENC YOLDAS, 2024).

Esse aspecto é decisivo para aplicações offshore e em regiões tropicais, nas quais o ambiente de serviço pode neutralizar parte dos ganhos iniciais obtidos em laboratório. Portanto, a durabilidade do reparo não deve ser estimada apenas pela resistência inicial do compósito, mas pela estabilidade da interface ao longo do tempo.

O Quadro 3 apresenta uma síntese crítica sobre o comportamento em fadiga e a durabilidade ambiental de sistemas FRP/aço, ou seja, de reparos/reforços de aço com compósitos poliméricos reforçados com fibras, como CFRP e GFRP. Ele mostra, de forma comparativa, quais aspectos já têm evidência experimental mais consolidada, quais ainda possuem evidência limitada e quais fatores ambientais podem comprometer o desempenho do reparo ao longo do tempo.

**Quadro 3** - Síntese crítica sobre fadiga e durabilidade em sistemas FRP/aço

<b>Aspecto analisado</b>	<b>Evidência predominante</b>	<b>Interpretação crítica</b>	<b>Fontes principais</b>
Fadiga em CFRP/aço	Evidência experimental consolidada	CFRP reduz abertura de trinca e retarda propagação quando a interface permanece íntegra.	Tavakkolizadeh e Saadatmanesh (2003); Kim e Harries (2011)

Fadiga em GFRP/aço	Evidência experimental relevante em juntas coladas, porém menos consolidada em reparo de trincas	GFRP pode atuar sob carregamento cíclico, mas a vida útil depende fortemente da interface, temperatura e envelhecimento.	Liu et al. (2020b, 2020c); Ülger e Okeil (2022)
Comparação CFRP x GFRP em aço sob carga cíclica	Evidência limitada, mas relevante em chapas finas sob cisalhamento	Ambos podem aumentar rigidez e resistência, mas a resposta depende da configuração de reforço e número de camadas.	Khazaei Poul, Nateghi-Alahi e Zhao (2016)
Ciclos úmido-seco	Afetam adesivo e interface	Umidade pode reduzir aderência e favorecer delaminação.	Li et al. (2018); Heshmati et al. (2017); Liu et al. (2020a)
Ciclos gelo-degelo/úmido-seco	Degradam juntas FRP/aço	A combinação de variação térmica e umidade acelera deterioração interfacial.	Heshmati et al. (2017); Ren et al. (2022)
Ambientes marinhos	Condição crítica para aplicação estrutural	Necessita validação de longo prazo e controle rigoroso de preparação superficial; estudos complementares em compósitos mostram sensibilidade à água do mar.	Kabir, Fawzia e Chan (2016); Borrie et al. (2021); Atakok e Mertgenc Yoldas (2024)
Weathering e carga cíclica em GFRP/aço	Evidência experimental em vigas com stiffeners	Intemperismo e carga cíclica influenciam o desempenho ao	Ülger e Okeil (2022)

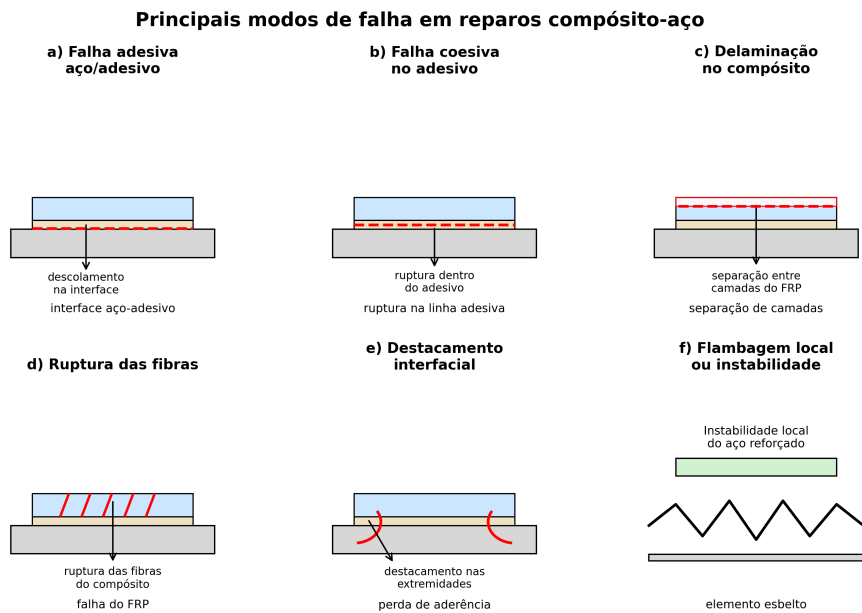
		cisalhamento de vigas reforçadas com GFRP.	
--	--	--	--

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base na literatura indicada.

Observa-se que a eficiência dos sistemas FRP/aço sob fadiga e exposição ambiental depende menos das propriedades isoladas das fibras e mais da estabilidade da interface adesiva ao longo do tempo. Assim, mesmo quando o compósito apresenta elevada resistência mecânica, a degradação do adesivo ou da interface aço-FRP pode comprometer a transferência de carga e reduzir a vida útil do reparo.

#### **4.4. Modos de Falha e Análise Microestrutural**

A Figura 4 resume os principais modos de falha observados em sistemas compósito-aço. Esses modos dependem da rigidez do compósito, da preparação superficial, da qualidade da linha adesiva, da geometria do reforço, do tipo de carregamento e das condições ambientais de exposição (Fernando et al., 2013; Heshmati; Haghani; Al-Emrani, 2017; Borrie et al., 2021; Liu et al., 2020a; Liu et al., 2020b; Liu et al., 2020c).



**Figura 4 – Principais modos de falha em reparos compósito-aço.**

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base em Fernando et al. (2013), Heshmati, Haghani e Al-Emrani (2017), Borrie et al. (2021) e Liu et al. (2020a, 2020b, 2020c).

A falha adesiva indica deficiência de ligação entre o aço e o adesivo, enquanto a falha coesiva sugere que a aderência ao substrato foi suficiente para transferir a ruptura para o interior da matriz adesiva. A delaminação e o destacamento interfacial estão associados a incompatibilidades de rigidez, concentração de tensões ou degradação ambiental. Em sistemas com GFRP e elementos esbeltos, a flambagem local e a perda de estabilidade também podem controlar o desempenho estrutural.

As análises relatadas na literatura indicam que os modos de falha diferem conforme a rigidez do reforço, a qualidade da interface e o ambiente de exposição. Em sistemas CFRP/aço, predominam delaminação, ruptura coesiva do adesivo e destacamento interfacial, especialmente quando há elevada transferência de carga para o compósito (BORRIE et al., 2021; HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017). Porém, em sistemas com menor rigidez, como GFRP ou configurações híbridas, a falha pode ocorrer de forma mais

progressiva, com maior deformação global antes da ruptura. Embora essa resposta limite a recuperação máxima de rigidez, pode contribuir para comportamento menos abrupto e maior absorção de energia. Essa diferença mostra que a seleção do material não deve se basear apenas em resistência máxima, mas também no tipo de carregamento predominante e no modo de falha aceitável para a aplicação.

Os estudos sobre GFRP/aço indicam ainda modos de falha associados à flambagem local, perda de estabilidade de elementos esbeltos, ruptura ou descolamento da placa de GFRP, degradação da junta adesiva e redução de eficiência em sistemas submetidos a intemperismo ou carregamento cíclico. Em chapas e vigas de aço reforçadas com placas de GFRP, o compósito pode atrasar ou modificar o modo de flambagem, enquanto em vigas com stiffeners colados de GFRP a eficiência depende da esbeltez inicial do painel, da qualidade da colagem e da exposição ambiental (SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2012; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2013; ÜLGER; OKEIL, 2016; ÜLGER; OKEIL, 2022). Em perfis tubulares e ligações tubulares, o comportamento é influenciado pela geometria do perfil, pelo posicionamento do reforço e pela transferência de esforços entre aço, adesivo e compósito (AGUILERA; FAM, 2013; BORU; AYDIN; SADID, 2023). Considerando os sistemas híbridos CFRP/GFRP ligados ao aço, os modos de falha também dependem da sequência de empilhamento, da rigidez relativa entre camadas e da distribuição de tensões na interface. Os ensaios com juntas híbridas FRP-aço mostram que a hibridização pode modificar a propagação de descolamento e a capacidade de transferência de carga, mas a interpretação desses resultados deve ser feita com cautela, pois tais sistemas não equivalem à comparação direta entre CFRP puro e GFRP puro (HAI; MUTSUYOSHI, 2012; HU et al., 2020).

Levando-se em conta o ponto de vista microestrutural e interfacial, a ocorrência de falha adesiva indica deficiência de ligação entre aço e adesivo, enquanto falha coesiva sugere que a aderência ao substrato foi suficiente para deslocar a ruptura para o interior da matriz adesiva. Já a delaminação no compósito ou na interface adesivo/compósito evidencia incompatibilidades de rigidez, concentração de tensões ou degradação ambiental acumulada. Em juntas GFRP/aço, o acompanhamento dos modos de falha após envelhecimento higrotérmico e ciclos de carregamento torna-se essencial para compreender a evolução da capacidade resistente ao longo do tempo (LIU et al., 2020a; LIU et al., 2020b; LIU et al., 2020c).

#### **4.5. Análise Crítica Comparativa CFRP X GFRP**

A comparação entre CFRP e GFRP evidencia que ambos possuem nichos de aplicação distintos. O CFRP apresenta superioridade clara em termos de resistência, rigidez e desempenho à fadiga, sendo mais indicado para reparos críticos, em que a estrutura opera próxima de limites de projeto, está sujeita a carregamentos cíclicos intensos ou exige elevada confiabilidade, como em pontes, oleodutos e plataformas offshore (TAVAKKOLIZADEH; SAADATMANESH, 2003; KIM; HARRIES, 2011; TAFSIROJJAMAN et al., 2022).

O GFRP, por outro lado, apresenta vantagens potenciais em ductilidade, absorção de energia, disponibilidade e custo. Seu desempenho estrutural tende a ser inferior ao do CFRP em situações que exigem elevada rigidez e controle de trincas, mas pode ser atrativo para aplicações preventivas, reforços secundários, estabilidade local, sistemas com stiffeners e reparos em componentes de menor criticidade. Além disso, o menor custo

relativo favorece intervenções em larga escala, sobretudo quando a solução precisa equilibrar desempenho e viabilidade econômica.

A comparação entre CFRP e GFRP deve ser conduzida com cautela. O CFRP possui literatura mais consolidada em reparos críticos de aço, especialmente em fadiga e controle de trincas. Entretanto, a literatura sobre GFRP/aço não é inexistente: há estudos experimentais sobre vigas, chapas, perfis RHS, juntas adesivas e sistemas de reforço por stiffeners. Esses trabalhos indicam que o GFRP pode ser tecnicamente viável em aplicações nas quais a exigência de rigidez extrema seja menor, mas a relação custo-benefício, a deformabilidade e a mitigação de flambagem sejam relevantes. Assim, o GFRP deve ser discutido como uma solução complementar ao CFRP, e não apenas como opção inferior (EL DAMATTY; ABUSHAGUR; YOUSSEF, 2003; AYDIN; AKTAS, 2015; BORU; AYDIN; SADID, 2023; ÜLGER; OKEIL, 2022).

Apesar do aumento do número de estudos sobre FRP aplicado a estruturas metálicas, ainda são escassas as comparações experimentais diretas entre CFRP e GFRP conduzidas sob condições rigorosamente equivalentes, isto é, com o mesmo tipo de aço, mesma geometria, mesmo adesivo, mesma preparação superficial, mesmo tipo de defeito, mesmo número de camadas e mesmo protocolo de carregamento ou envelhecimento. Entre os estudos mais próximos dessa condição, destacam-se os ensaios com chapas finas de aço reforçadas com CFRP e GFRP sob carregamento cíclico de cisalhamento, nos quais ambos os materiais mostraram capacidade de aumentar a rigidez e a resistência do sistema, com ganhos dependentes do número de camadas e da configuração do reforço (KHAZAEI POUL; NATEGHI-ALAH; ZHAO, 2016). No entanto, essa evidência não elimina a necessidade de novos estudos

comparativos em placas perfuradas, elementos corroídos, juntas adesivas aço-FRP e componentes submetidos a ambientes agressivos.

Além das comparações diretas, sistemas híbridos CFRP/GFRP oferecem uma rota intermediária para combinar elevada rigidez, maior deformabilidade e melhor distribuição de tensões. Contudo, esses estudos devem ser discutidos como hibridização e não como substituição direta da comparação entre compósitos puros. A distinção é essencial para evitar interpretações equivocadas sobre desempenho relativo de CFRP e GFRP em aço (HAI; MUTSUYOSHI, 2012; HU et al., 2020).

Uma alternativa promissora para otimizar a relação custo-benefício e o desempenho mecânico de reparos estruturais é a hibridização, por meio da combinação de camadas alternadas de CFRP e GFRP. Nesse tipo de configuração, a sequência de empilhamento (stacking sequence) exerce papel relevante na magnitude e na distribuição das tensões de cisalhamento e de arrancamento (peel stresses) na interface adesiva compósito-aço. Devido à diferença de rigidez entre as fibras de carbono, associadas a maior módulo de elasticidade, e as fibras de vidro, associadas a menor módulo e maior deformabilidade, a disposição das lâminas influencia o gradiente de transferência de carga ao longo do reparo. Estudos numéricos e experimentais indicam que o posicionamento de camadas de GFRP diretamente em contato com a linha adesiva pode atuar como uma zona de transição de rigidez, atenuando picos de tensão nas extremidades do reparo. Por outro lado, a concentração de camadas de CFRP na região externa do laminado tende a aumentar a rigidez global à flexão ou à tração, sem necessariamente sobrecarregar localmente a camada adesiva. Essa modulação da sequência de

empilhamento pode contribuir para postergar falhas prematuras por delaminação ou descolamento (debonding), combinando a eficiência estrutural do carbono com a maior complacência e o isolamento dielétrico do vidro (Sarrado et al., 2016).

O Quadro 4 sintetiza a comparação crítica entre CFRP e GFRP em reparos/reforços de aços estruturais, considerando resistência mecânica, comportamento à fadiga, ductilidade, custo relativo, durabilidade, adesão ao aço, modos de falha, comparações diretas disponíveis, aplicações indicadas e sustentabilidade.

**Quadro 4** - Comparação crítica entre CFRP e GFRP em reparos/reforços de aços estruturais

<b>Critério</b>	<b>CFRP</b>	<b>GFRP</b>	<b>Interpretação crítica</b>	<b>Fontes principais</b>
Resistência mecânica	Alta; mais adequado para reparos críticos	Moderada a relevante; adequada para aplicações menos exigentes, estabilidade local e reforços secundários	CFRP tende a ser preferível quando a rigidez e a resistência máxima são determinantes; GFRP pode ser suficiente em aplicações de menor criticidade.	Zhao e Zhang (2007); Tafsirojjaman et al. (2022)
Comportamento à fadiga	Evidência experimental mais consolidada em aço, especialmente em	Evidência relevante em juntas GFRP/aço e sistemas submetidos à carga	O CFRP possui base mais robusta em fadiga; o GFRP requer mais estudos em trincas e	Tavakkolizadeh e Saadatmanesh (2003); Kim e Harries (2011); Liu et

	controle de trincas	cíclica, mas menos consolidada em reparo de trincas	defeitos localizados.	al. (2020b, 2020c)
Ductilidade global	Menor deformabilidade global	Maior deformabilidade relativa	A menor rigidez do GFRP pode favorecer deformabilidade e absorção de energia em aplicações específicas.	Zhao e Zhang (2007); Tafsirojjaman et al. (2022)
Custo relativo	Mais elevado	Menor que CFRP, favorecendo aplicação em maior escala	O custo deve ser avaliado junto com durabilidade, vida útil e frequência de manutenção.	Eamon et al. (2012); Al Omar e Abdelhadi (2024)
Durabilidade	Boa quando a interface é protegida; sensível à degradação adesiva	Depende do sistema matriz/fibra/adesivo; há estudos sobre ciclos úmido-seco, higrotérmicos e intemperismo em juntas e stiffeners	A interface adesiva é o ponto crítico comum aos dois sistemas.	Heshmati, Haghani e Al-Emrani (2017); Liu et al. (2020a, 2020b); Ülger e Okeil (2022)

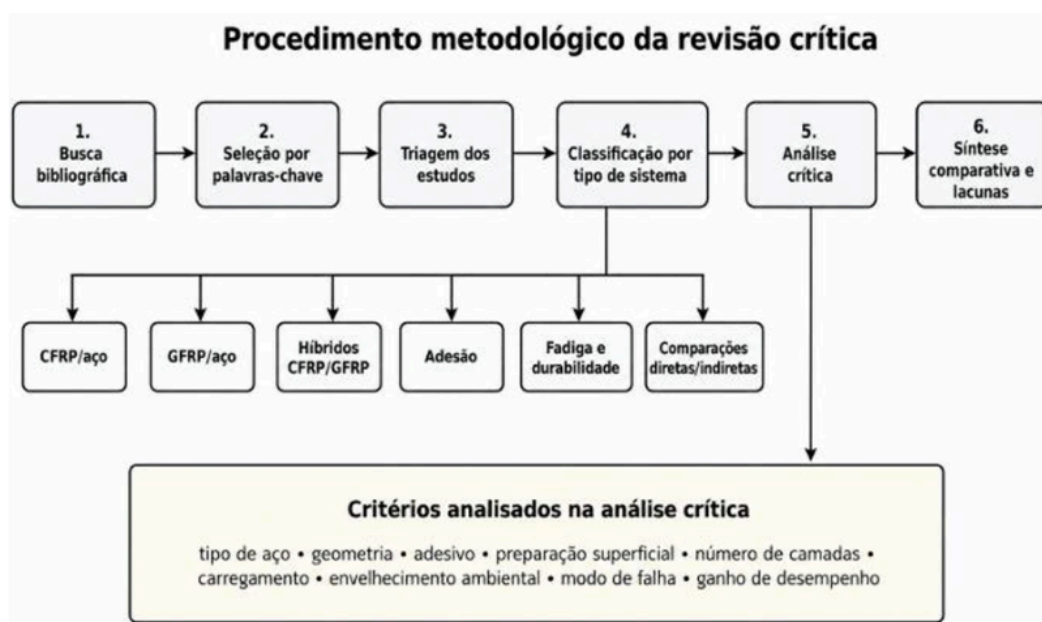
<p>Adesão ao aço</p>	<p>Exige preparação rigorosa e controle da linha adesiva</p>	<p>Também depende de preparação; estudos double-strap demonstram sensibilidade à cura, temperatura e envelhecime nto</p>	<p>A comparação entre compósitos deve controlar adesivo, espessura da linha adesiva e preparação superficial.</p>	<p>Fernando et al. (2013); Borrie et al. (2021); Liu et al. (2020a, 2020c)</p>
<p>Modos de falha</p>	<p>Delaminaçã o, falha coesiva/ades iva e destacamen to interfacial</p>	<p>Falhas potencialme nte mais progressivas; descolament o, flambagem local, perda de estabilidade e degradação da junta adesiva</p>	<p>O modo de falha depende da rigidez do compósito, geometria, adesivo e ambiente.</p>	<p>Borrie et al. (2021); Siddique e El Damatty (2012, 2013); Ülger e Okeil (2016, 2022)</p>
<p>Comparaç ões diretas disponíveis</p>	<p>Literatura mais consolidada em reparos críticos, fadiga e controle de trincas</p>	<p>Estudos diretos ainda menos frequentes; há evidência em chapas finas, juntas, sistemas híbridos e aplicações de estabilidade local</p>	<p>A seleção entre CFRP e GFRP ainda depende majoritariam ente de comparações indiretas, pois poucos estudos mantêm todas as variáveis experimentai</p>	<p>Khazaei Poul, Nateghi- Alahi e Zhao (2016); Hai e Mutsuyoshi (2012); Hu et al. (2020)</p>

			s equivalentes.	
Aplicações indicadas	Pontes, oleodutos, estruturas offshore e reparos de alta responsabilidade	Reparos preventivos, secundários, estabilidade local, stiffeners, perfis RHS, chapas e vigas de menor criticidade	CFRP e GFRP devem ser tratados como soluções complementares, não como materiais intercambiáveis sem análise de contexto.	Cadei et al. (2004); Borrie et al. (2021); El Damatty, Abushagur e Youssef (2003); Boru, Aydin e Sadid (2023)
Sustentabilidade	Exige análise de ciclo de vida considerando energia incorporada, durabilidade e manutenção	Pode apresentar melhor custo-benefício em aplicações de menor exigência, mas requer ACV específica para reparos compósito-aço	A sustentabilidade depende da vida útil alcançada, manutenção evitada e impacto inicial do material.	Eamon et al. (2012); Al Omar e Abdelhadi (2024)

**Fonte:** Elaborado pelos autores com base na literatura.

Com base na análise crítica da literatura, a Figura 5 apresenta um mapa conceitual para seleção entre CFRP, GFRP e sistemas híbridos em reparos de aço estrutural. O objetivo não é estabelecer uma regra universal, mas organizar os principais critérios técnicos que devem orientar a escolha do material de reforço conforme

criticidade estrutural, rigidez requerida, fadiga, custo, ductilidade, ambiente de serviço e estratégia de manutenção.



**Figura 2** – Fluxo metodológico de seleção, classificação e análise crítica da literatura. **Fonte:** Elaborado pelos autores com base no procedimento metodológico da revisão.

O mapa evidencia que CFRP e GFRP não devem ser tratados como materiais intercambiáveis. O CFRP tende a ser mais indicado quando a exigência estrutural, a rigidez e a confiabilidade em fadiga são determinantes. O GFRP pode ser mais adequado quando custo, deformabilidade, estabilidade local e aplicação preventiva são fatores prioritários. Sistemas híbridos CFRP/GFRP constituem alternativa promissora quando se busca combinar rigidez, ductilidade e melhor distribuição de tensões, embora ainda exijam validação experimental específica.

A interpretação integrada dos estudos permite concluir que o CFRP não é “melhor” em qualquer contexto, mas é o sistema de maior desempenho quando a exigência estrutural é elevada. O GFRP, por sua vez, não deve ser tratado como alternativa inferior, mas como solução distinta e complementar, mais adequada quando se busca equilíbrio entre custo, ductilidade, facilidade de aplicação,

estabilidade local e desempenho suficiente. Essa distinção é relevante porque evita generalizações excessivas e favorece critérios de seleção mais compatíveis com a prática de engenharia.

Além dos aspectos puramente mecânicos e de aderência, a durabilidade química da interface compósito-aço é fortemente influenciada por fenômenos eletroquímicos, com destaque para a corrosão galvânica. Embora o CFRP possua propriedades mecânicas excepcionais, a fibra de carbono é um excelente condutor elétrico e exibe um potencial nobre na série galvânica. Conseqüentemente, se o CFRP for colocado em contato elétrico direto com o aço estrutural em presença de um eletrólito (como a umidade salina em ambientes marinhos ou offshore), forma-se uma célula galvânica na qual o aço atua como ânodo, sofrendo uma aceleração severa em sua taxa de corrosão localizada. Esse risco físico real exige que a camada adesiva epóxi atue não apenas como meio de transferência de carga, mas também como uma barreira isolante contínua. É nesse cenário que o GFRP e os sistemas híbridos ganham ainda mais relevância prática: por ser eletricamente isolante, a fibra de vidro elimina intrinsecamente o circuito galvânico. A utilização de uma película ou camada de GFRP como interface direta com o aço funciona como um isolamento dielétrico absoluto, mitigando o risco de degradação acelerada do substrato metálico mesmo sob falhas localizadas da película de adesivo.(DU et al., 2023) ou (XIE et al., 2024).

#### **4.6. Implicações Práticas, Econômicas e Ambientais**

Os aspectos econômicos desempenham papel fundamental na seleção do material de reparo. Embora o CFRP apresente desempenho superior em muitas situações, seu custo inicial é

significativamente mais elevado que o do GFRP e do aço. Entretanto, quando se considera custo do ciclo de vida, o CFRP pode tornar-se economicamente viável em estruturas críticas, pois sua maior eficiência mecânica e melhor desempenho em fadiga podem reduzir frequência de manutenção, custo de inspeção e probabilidade de falha (EAMON et al., 2012).

Em relação ao ponto de vista ambiental, a literatura ainda apresenta escassez de análises de ciclo de vida consistentes para reparos compósitos em aço. Essa lacuna impede afirmar, de forma conclusiva, qual sistema é mais sustentável em termos absolutos. Em muitos casos, a maior durabilidade de um reparo com CFRP pode compensar seu maior custo energético inicial, enquanto o menor custo e a viabilidade em larga escala do GFRP podem favorecer aplicações com menor exigência estrutural. Portanto, a avaliação ambiental precisa ser integrada à vida útil efetivamente alcançada e ao regime de manutenção esperado (EAMON et al., 2012; AL OMAR; ABDELHADI, 2024).

A análise de ciclo de vida ainda é mais comum em estudos relacionados a barras, armaduras e aplicações de GFRP em concreto do que em reparos diretos de aço com FRP. Assim, há uma lacuna específica a ser preenchida por estudos que combinem desempenho mecânico, durabilidade, impacto ambiental e custo do ciclo de vida de reparos compósito-aço. No caso do GFRP, essa análise é particularmente relevante, pois seu menor custo relativo e sua aplicação em reforços secundários ou preventivos podem alterar o balanço técnico-econômico em relação ao CFRP.

Sendo assim, a ausência de comparações diretas CFRP x GFRP sob condições equivalentes também dificulta análises econômicas e

ambientais mais rigorosas. Sem controlar o tipo de aço, a geometria, o adesivo, a preparação superficial, o número de camadas e o ambiente de exposição, torna-se difícil determinar se o maior custo inicial do CFRP é compensado por maior durabilidade ou se o menor custo do GFRP oferece melhor relação custo-benefício em aplicações específicas.

Estudos sobre reforço de estruturas metálicas delgadas e tanques com FRP também indicam a relevância de avaliar o comportamento de sistemas compósito-metal sob carregamentos dinâmicos, embora nem sempre realizem comparação direta entre CFRP e GFRP em condições equivalentes (PHAN VIET; KITANO; MATSUMOTO, 2020).

#### **4.7. Lacunas da Literatura e Perspectivas Futuras**

Apesar do avanço expressivo da pesquisa sobre reparo de aço estrutural com compósitos, a literatura ainda apresenta limitações importantes. A primeira delas é a heterogeneidade metodológica. Diferenças em geometria de amostras, espessura do aço, tipo de defeito, número de camadas, orientação das fibras, espessura do adesivo, tratamento superficial e condicionamento ambiental dificultam a comparação direta entre estudos e reduzem a capacidade de generalização dos resultados (ZHAO; ZHANG, 2007; TAFSIROJJAMAN et al., 2022).

No caso específico do GFRP/aço, a limitação não deve ser descrita como ausência de literatura, mas como dispersão temática e menor consolidação em aplicações de reparo crítico. Há estudos experimentais relevantes envolvendo vigas, chapas, perfis tubulares, juntas adesivas e sistemas com stiffeners; entretanto, ainda são

menos frequentes os estudos que tratam diretamente do reparo de defeitos localizados, trincas ou perfurações em aço com GFRP sob as mesmas condições experimentais utilizadas para CFRP (EL DAMATTY; ABUSHAGUR; YOUSSEF, 2003; SIDDIQUE; EL DAMATTY, 2012; AYDIN; AKTAS, 2015; LIU et al., 2020a; BORU; AYDIN; SADID, 2023).

Uma lacuna relevante identificada nesta revisão é a escassez de estudos comparativos diretos entre CFRP e GFRP aplicados ao reparo de aço estrutural sob condições experimentais equivalentes. Embora existam estudos sobre CFRP/aço, GFRP/aço e sistemas híbridos CFRP/GFRP, poucos trabalhos comparam os dois compósitos mantendo constantes o substrato metálico, a geometria, o adesivo, a preparação superficial, o tipo de defeito, o número de camadas e as condições ambientais. Essa limitação dificulta a definição de critérios quantitativos universais para seleção entre CFRP e GFRP. Assim, futuras pesquisas devem priorizar programas experimentais comparativos controlados, capazes de avaliar resistência, rigidez, fadiga, adesão, durabilidade e custo do ciclo de vida em uma mesma matriz experimental (KHAZAEI POUL; NATEGHI-ALAH; ZHAO, 2016; HAI; MUTSUYOSHI, 2012; HU et al., 2020).

Outra limitação importante é a predominância de ensaios em laboratório com placas e vigas de pequena escala. Embora esses ensaios sejam fundamentais para compreensão dos mecanismos, não reproduzem integralmente as condições reais de serviço, que frequentemente envolvem carregamentos multiaxiais, variações térmicas, umidade, salinidade, radiação UV, impacto e vibração simultaneamente.

Também são escassos os estudos de longa duração em campo. Muitos trabalhos utilizam envelhecimento acelerado, como ciclos úmido-seco, higrotérmicos ou gelo-degelo, mas ainda não está plenamente estabelecida a equivalência entre esses protocolos e a degradação real em anos de serviço. Isso é particularmente relevante para aplicações offshore e em ambientes tropicais (HESHMATI; HAGHANI; AL-EMRANI, 2017; KABIR; FAWZIA; CHAN, 2016; REN et al., 2022; LIU et al., 2020b; ÜLGER; OKEIL, 2022).

No campo da adesão, embora primers, epóxis modificados e tratamentos de superfície tenham mostrado grande potencial, ainda não existe consenso sobre protocolos ótimos para diferentes combinações de aço, compósito e ambiente. Essa lacuna também se aplica às juntas CFRP/aço, nas quais a influência de cura, temperatura, envelhecimento higrotérmico e carregamento cíclico ainda exige padronização experimental mais ampla (FERNANDO et al., 2013; BORRIE et al., 2021; LIU et al., 2020a; LIU et al., 2020c).

As estratégias híbridas CFRP/GFRP em camadas alternadas representam uma linha promissora, pois podem combinar a rigidez do CFRP com a ductilidade e o menor custo do GFRP. Contudo, essa abordagem ainda carece de validação em escala real e não substitui a necessidade de comparações diretas entre CFRP puro e GFRP puro sob condições equivalentes. Da mesma forma, o uso de sensores embutidos em compósitos para monitoramento da integridade estrutural em tempo real configura uma tendência relevante, mas ainda enfrenta desafios relacionados a custo, robustez e confiabilidade a longo prazo.

Assim, as perspectivas futuras mais relevantes incluem: ensaios em escala real; padronização de protocolos de preparação superficial e

ensaio adesivo; estudos comparativos entre CFRP e GFRP sob as mesmas geometrias, defeitos e condições ambientais; avaliação de reparos de defeitos localizados com GFRP; estudos comparativos entre envelhecimento natural e acelerado; análises de ciclo de vida específicas para reparos compósito-aço; desenvolvimento de sistemas híbridos CFRP/GFRP; e integração de tecnologias de monitoramento estrutural.

## **5. CONCLUSÃO**

A revisão crítica consolidada demonstra que os compósitos CFRP e GFRP constituem alternativas tecnicamente viáveis para reparo e reforço de aços estruturais degradados, com vantagens importantes em relação a métodos convencionais quando corretamente projetados e aplicados. Entretanto, a aplicabilidade desses materiais depende da compatibilidade entre desempenho mecânico, adesão, durabilidade, custo e ambiente de serviço.

O CFRP apresenta desempenho superior em resistência, rigidez e fadiga, o que justifica sua indicação prioritária em reparos críticos, nos quais a estrutura opera sob alta responsabilidade e exige elevada confiabilidade, como em pontes, oleodutos e plataformas offshore. Seu elevado módulo favorece melhor redistribuição de tensões e maior eficiência no retardamento da propagação de trincas, desde que a interface adesiva permaneça íntegra ao longo do serviço.

O GFRP, embora apresente recuperação mecânica mais moderada em comparação ao CFRP, mostra vantagens potenciais em ductilidade, absorção de energia, tolerância ao impacto, estabilidade local e custo relativo. Por isso, configura-se como opção

tecnicamente adequada para reparos preventivos, reforços secundários, sistemas com stiffeners, chapas e vigas esbeltas e aplicações de menor exigência estrutural, especialmente quando se busca equilíbrio entre desempenho e viabilidade econômica.

A literatura específica sobre GFRP aplicado diretamente ao reparo de aço estrutural ainda é menos consolidada que a literatura sobre CFRP/aço em reparos críticos e fadiga. Entretanto, há evidências experimentais relevantes envolvendo vigas reabilitadas com GFRP, chapas reforçadas contra flambagem, placas de aço reparadas, perfis RHS reforçados, juntas GFRP/aço submetidas a envelhecimento higrotérmico e sistemas com stiffeners expostos a intemperismo e carga cíclica. Assim, o GFRP deve ser reconhecido como solução complementar ao CFRP, e não apenas como material inferior.

Em relação à comparação entre CFRP e GFRP, essa ainda é limitada pela ausência de estudos experimentais plenamente equivalentes. Como mencionado anteriormente, a literatura disponível demonstra maior consolidação do CFRP em rigidez, resistência e controle de trincas, mas também indica que o GFRP pode ser tecnicamente viável em aplicações de estabilidade local, reforços secundários, juntas adesivas, sistemas híbridos e intervenções de menor criticidade. Portanto, uma contribuição crítica desta revisão é evidenciar que a seleção entre CFRP e GFRP ainda carece de estudos comparativos diretos, conduzidos com o mesmo aço, mesma geometria, mesmo defeito, mesmo adesivo, mesma preparação superficial e mesmos protocolos ambientais.

A adesão entre compósito e aço é o fator central para o sucesso do reparo. A preparação superficial, o tipo de adesivo, a espessura da

linha adesiva, as condições de cura e o uso de primers devem ser tratados como variáveis críticas de projeto. Em ambientes agressivos, a durabilidade do sistema é governada principalmente pela estabilidade da interface, e não apenas pelas propriedades intrínsecas das fibras.

Os estudos mostram que não existe solução universal. O CFRP é a escolha preferencial para reparos críticos e situações dominadas por fadiga e controle de trincas, enquanto o GFRP pode oferecer melhor relação custo-benefício em reparos menos exigentes, aplicações de estabilidade local, reforços secundários e intervenções preventivas. A escolha entre os dois materiais deve considerar, de forma integrada, desempenho mecânico, adesão, durabilidade, custo, ambiente de serviço, estratégia de manutenção e nível de evidência experimental disponível.

Por fim, a literatura atual ainda apresenta limitações relevantes, como falta de padronização metodológica, escassez de ensaios em escala real, carência de estudos de longo prazo em campo, ausência de comparações diretas CFRP x GFRP sob condições experimentais equivalentes e número reduzido de análises de ciclo de vida aplicadas especificamente a reparos compósito-aço. O avanço futuro da área dependerá do desenvolvimento de sistemas híbridos CFRP/GFRP, adesivos e primers otimizados, protocolos mais robustos de durabilidade, validação em escala real e incorporação de sensores embutidos para monitoramento em tempo real da integridade estrutural.

## **FINANCIAMENTO**

Esta pesquisa não recebeu financiamento.

## CONFLITO DE INTERESSES

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

## DECLARAÇÃO DO CONSELHO DE ÉTICA

Não se aplica, por se tratar de estudo de revisão bibliográfica, sem envolvimento de seres humanos ou animais.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILERA, J.; FAM, A. Retrofitting tubular steel T-joints subjected to axial compression in chord and brace members using bonded FRP plates or through-wall steel bolts. *Engineering Structures*, v. 48, p. 602-610, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2012.09.018>.

AL OMAR, Saad; ABDELHADI, Abdelhakim. Comparative Life-Cycle Assessment of Steel and GFRP Rebars for Procurement Sustainability in the Construction Industry. *Sustainability*, v. 16, n. 10, p. 3899, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su16103899>.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A36/A36M: Standard Specification for Carbon Structural Steel. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM A370: Standard Test Methods and Definitions for Mechanical Testing of Steel Products. West Conshohocken: ASTM International, 2024.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D1002: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-

Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading. West Conshohocken: ASTM International, 2019.

AMERICAN SOCIETY FOR TESTING AND MATERIALS. ASTM D4541: Standard Test Method for Pull-Off Strength of Coatings Using Portable Adhesion Testers. West Conshohocken: ASTM International, 2022.

ATAKOK, Gurcan; MERTGENC YOLDAS, Dudu. Comparison of GFRP (Glass Fiber-Reinforced Polymer) and CFRP (Carbon Fiber-Reinforced Polymer) Composite Adhesive-Bonded Single-Lap Joints Used in Marine Environments. Sustainability, v. 16, n. 24, artigo 11105, 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/su162411105>.

AYDIN, E.; AKTAS, M. Obtaining a permanent repair by using GFRP in steel plates reformed by heat-treatment. Thin-Walled Structures, v. 94, p. 13-22, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2015.03.027>.

BORRIE, Daniel; AL-SAAD, Saad; ZHAO, Xiao-Ling; RAMAN, R. K. Singh; BAI, Yu. Bonded CFRP/Steel Systems, Remedies of Bond Degradation and Behaviour of CFRP Repaired Steel: An Overview. Polymers, v. 13, n. 9, p. 1533, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym13091533>.

BORU, E.; AYDIN, E.; SADID, M. S. Investigation of bending behaviors of GFRP-strengthened steel RHS profiles with experimental and numerical models. Buildings, v. 13, n. 5, artigo 1216, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings13051216>.

CADEI, J. M. C.; STRATFORD, T. J.; DUCKETT, W. G.; HOLLAWAY, L. C. Strengthening metallic structures using externally bonded fibre-reinforced polymers. London: CIRIA, 2004. CIRIA Report C595.

DU, Y.; KANG, L.; LI, M.; CHEN, T. Electrochemical and galvanic corrosion behavior of CFRP/steel bonded joints exposed to simulated marine environments. **Corrosion Science**, v. 212, artigo 110943, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.corsci.2022.110943>.

EAMON, Christopher D.; JENSEN, Elin A.; GRACE, Nabil F.; SHI, Xiuwei. Life-Cycle Cost Analysis of Alternative Reinforcement Materials for Bridge Superstructures Considering Cost and Maintenance Uncertainties. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 24, n. 4, p. 373-380, 2012. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0000398](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0000398).

EL DAMATTY, A. A.; ABUSHAGUR, M.; YOUSSEF, M. A. Experimental and analytical investigation of steel beams rehabilitated using GFRP sheets. *Steel and Composite Structures*, v. 3, n. 6, p. 421-438, 2003. DOI: <https://doi.org/10.12989/scs.2003.3.6.421>.

FERNANDO, Dilum; TENG, Jin-Guang; YU, Tao; ZHAO, Xiao-Ling. Preparation and Characterization of Steel Surfaces for Adhesive Bonding. *Journal of Composites for Construction*, v. 17, n. 6, p. 04013012, 2013. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0000387](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0000387).

HAI, Nguyen Duc; MUTSUYOSHI, Hiroshi. Structural behavior of double-lap joints of steel splice plates bolted/bonded to pultruded hybrid CFRP/GFRP laminates. *Construction and Building Materials*, v. 30, p. 347-359, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2011.12.001>.

HESHMATI, Mohsen; HAGHANI, Reza; AL-EMRANI, Mohammad. Durability of CFRP/steel joints under cyclic wet-dry and freeze-thaw

conditions. *Composites Part B: Engineering*, v. 126, p. 211-226, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2017.06.011>.

HU, Bo; LI, Yuan; JIANG, Yu-Tian; TANG, Huai-Zhong. Bond behavior of hybrid FRP-to-steel joints. *Composite Structures*, v. 237, artigo 111936, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2020.111936>.

KABIR, M. H.; FAWZIA, S.; CHAN, T. H. T. Durability of CFRP strengthened circular hollow steel members under cold weather: experimental and numerical investigation. *Construction and Building Materials*, v. 123, p. 372-383, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.06.116>.

KABIR, M. H.; FAWZIA, S.; CHAN, T. H. T.; GAMAGE, J. C. P. H. Comparative durability study of CFRP strengthened tubular steel members under cold weather. *Materials and Structures*, v. 49, p. 1761-1774, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1617/s11527-015-0610-x>.

KHAZAEI POUL, Masoud; NATEGHI-ALAH, Fariborz; ZHAO, Xiao-Ling. Experimental testing on CFRP strengthened thin steel plates under shear loading. *Thin-Walled Structures*, v. 109, p. 217-226, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.09.026>.

KIM, Yail J.; HARRIES, Kent A. Fatigue behavior of damaged steel beams repaired with CFRP strips. *Engineering Structures*, v. 33, n. 5, p. 1491-1502, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.01.019>.

LI, Shan; HU, Jiyue; LIANG, Hongjun. Durability of CFRP Strengthened Steel Plates Under Wet and Dry Cycles. *International Journal of Steel Structures*, v. 18, p. 381-390, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13296-018-0009-y>.

LIU, J.; GUO, T.; HEBDON, M. H.; JIA, J. Investigation of fatigue behavior of steel and GFRP double-strap joints under varied cyclic loading at given temperatures. *Journal of Materials in Civil Engineering*, v. 32, n. 4, artigo 04020035, 2020c. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0003098](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0003098).

LIU, J.; GUO, T.; HEBDON, M. H.; LIU, Z.; WANG, L. Bonding behaviors of GFRP/steel bonded joints after wet-dry cyclic and hygrothermal curing. *Applied Sciences*, v. 10, n. 16, artigo 5411, 2020a. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10165411>.

LIU, J.; GUO, T.; HEBDON, M. H.; YU, X.; WANG, L. Behaviors of GFRP-steel bonded joints under cyclic loading after hygrothermal aging. *Construction and Building Materials*, v. 242, artigo 118106, 2020b. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118106>.

LIU, Xiaodong; SU, Qingyong; ZHU, Jing; SONG, Xiaopeng. The Aging Behavior and Life Prediction of CFRP Rods under a Hygrothermal Environment. *Polymers*, v. 15, n. 11, p. 2490, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym15112490>.

MEIER, U. Strengthening of structures using carbon fibre/epoxy composites. *Construction and Building Materials*, v. 9, n. 6, p. 341-351, 1995. DOI: [https://doi.org/10.1016/0950-0618\(95\)00071-2](https://doi.org/10.1016/0950-0618(95)00071-2).

PHAM, P. V.; MOHAREB, M.; FAM, A. Lateral torsional buckling of steel beams strengthened with GFRP plate. *Thin-Walled Structures*, v. 131, p. 55-75, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2018.06.025>.

PHAN VIET, Nhut; KITANO, Yukio; MATSUMOTO, Yukihiro. Experimental Investigations of the Strengthening Effects of CFRP for

Thin-Walled Storage Tanks under Dynamic Loads. Applied Sciences, v. 10, n. 7, artigo 2521, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/app10072521>.

REN, Xiang; JIANG, Lingzhi; HE, Jun; YANG, Yi; SUN, Yamin; LIU, Qunfeng; CHEN, Shaojie. Durability of CFRP-Steel Double-Lap Joints under Cyclic Freeze-Thaw/Wet-Dry Conditions. Polymers, v. 14, n. 17, p. 3445, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14173445>.

SARRADO, C.; TURON, A.; COSTA, J.; RENART, J. Effect of stacking sequence on the cohesive law of composite bonded joints. **International Journal of Adhesion and Adhesives**, v. 68, p. 74-83, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2016.02.006>.

SIDDIQUE, M. A. A.; EL DAMATTY, A. A. Enhancement of buckling capacity of steel plates strengthened with GFRP plates. Thin-Walled Structures, v. 60, p. 154-162, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2012.06.013>.

SIDDIQUE, M. A. A.; EL DAMATTY, A. A. Improvement of local buckling behaviour of steel beams through bonding GFRP plates. Composite Structures, v. 96, p. 44-56, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2012.08.042>.

TAFSIROJJAMAN, T.; DOGAR, Attiq Ur Rahman; LIU, Yue; MANALO, Allan; THAMBIRATNAM, David P. Performance and design of steel structures reinforced with FRP composites: a state-of-the-art review. Engineering Failure Analysis, v. 138, artigo 106371, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2022.106371>.

TAVAKKOLIZADEH, M.; SAADATMANESH, H. Fatigue Strength of Steel Girders Strengthened with Carbon Fiber Reinforced Polymer

Patch. Journal of Structural Engineering, v. 129, n. 2, p. 186-196, 2003.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9445\(2003\)129:2\(186\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9445(2003)129:2(186)).

ÜLGER, T.; OKEIL, A. M. Effect of initial panel slenderness on efficiency of Strengthening-By-Stiffening using FRP for shear deficient steel beams. Thin-Walled Structures, v. 105, p. 147-155, 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tws.2016.04.006>.

ÜLGER, T.; OKEIL, A. M. Shear performance of steel beams with bonded GFRP stiffeners: weathering and cyclic load effects. Journal of Composites for Construction, v. 26, n. 6, artigo 04022081, 2022.  
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CC.1943-5614.0001276](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CC.1943-5614.0001276).

XIE, X.; FENG, Y.; LIU, W.; CHEN, J. Mitigating galvanic corrosion in carbon fiber reinforced polymer (CFRP) to structural steel joints using glass fiber isolation layers. **Construction and Building Materials**, v. 411, artigo 134321, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134321>.

ZHAO, X. L.; ZHANG, L. State-of-the-art review on FRP strengthened steel structures. Engineering Structures, v. 29, n. 8, p. 1808-1823, 2007.  
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2006.10.006>.

---

<sup>1</sup> Discente do programa de Pós-graduação de Ciência e Tecnologia em Materiais (PPGCTM) da Faculdade de Ciências Exatas e Engenharias da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)

<sup>2</sup> Docente do programa de Pós-graduação de Ciência e Tecnologia em Materiais (PPGCTM) da Faculdade de Ciências Exatas e

Engenharias da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). E-mail: [acesse o artigo original para visualizar o e-mail](#)